第 38 卷第 4 期 生 态 学 报 Vol.38,No.4
2018 年 2 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Feb.,2018

DOI: 10.5846/stxb201701100076
徐文茹,贺红士,罗旭,黄超,唐志强,刘凯,丛毓,谷晓楠,宗盛伟,杜海波.停止商业性采伐对大兴安岭森林结构与地上生物量的影响.生态学报,2018,38(4):1203-1215.
Xu W R, He H S, Luo X, Huang C, Tang Z Q, Liu K, Cong Y, Gu X N, Zong S W, Du H B.Long-term effects of commercial harvest exclusion on forest structure and aboveground biomass in the Great Xing′an Mountains, China.Acta Ecologica Sinica,2018,38(4):1203-1215.

停止商业性采伐对大兴安岭森林结构与地上生物量的影响

徐文茹[1],贺红士[1,2,*],罗　旭[3],黄　超[4],唐志强[5],刘　凯[1],丛　毓[1],谷晓楠[1],宗盛伟[1],杜海波[1]

1 东北师范大学地理科学学院,长春　130024
2 美国密苏里大学自然资源学院, 哥伦比亚 MO 65211
3 宁波大学建筑工程与环境学院,宁波　315211
4 森林与土壤生态国家重点实验室,中国科学院沈阳应用生态研究所,沈阳　110016
5 国家林业局大兴安岭林业调查规划设计院,加格达奇　165000

摘要:采伐是北方森林最主要的人为干扰之一,过去高强度采伐导致森林植被组成单一化和均质化。为提高森林的生态功能和经济效益,国家先后于 2000 年实施“天然林资源保护工程”、2014 年实施全面停止天然林商业性采伐。为评价这两种政策下不同的采伐干扰对森林的直接影响,以大兴安岭林区为研究对象,采用空间直观景观模型 LANDIS PRO,模拟比较 2000—2100 年“天然林资源保护工程”、全面停止商业性采伐政策下森林树种组成、年龄结构及森林地上生物量的长期变化特征及其差异性。研究结果表明:1)模型初始化的林分密度、地上生物量与 2000 年野外调查数据相吻合($P<0.01$),模型模拟结果具有较高的可靠性;2)对比分类经营,全面停止商业性采伐的实施:增大了优势树种(落叶松与白桦)的树种组成比例,减小了保护树种(云杉与樟子松)的比例;对树种组成在中长期影响显著($P<0.05$),降低了树种组成结构的多样性;总体上增加了林分平均胸高断面积,减小了林分密度;3)模型模拟 100 年,全面停止商业性采伐下中幼龄林向成熟林过渡,改善森林年龄结构;4)与分类经营相比,整个模拟时期内全面停止商业性采伐增加森林地上生物量,提高森林恢复速率,有助于森林地上总生物量的恢复与累积。但保护树种(云杉与樟子松)森林地上生物量在一定程度上有所下降,不利于提高珍贵树种的丰度。对评估森林管理方案在森林资源恢复上的作用和有效实施森林生态系统管理有重要的参考意义。

关键词:全面停止天然林商业性采伐;分类经营;大兴安岭;森林景观;地上生物量;LANDIS PRO

Long-term effects of commercial harvest exclusion on forest structure and aboveground biomass in the Great Xing′an Mountains, China

XU Wenru[1], HE Hongshi[1,2,*], LUO Xu[3], HUANG Chao[4], TANG Zhiqiang[5], LIU Kai[1], CONG Yu[1], GU Xiaonan[1], ZONG Shengwei[1], DU Haibo[1]

1 *School of Geographical Sciences, Northeast Normal University, Changchun* 130024, *China*
2 *School of Natural Resource, University of Missouri*, 203 *ABNR Bldg, Columbia MO* 65211, *USA*
3 *Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo* 315211, *China*
4 *State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang* 110016, *China*
5 *Forestry Investigation and Design Institute of State Forestry in of Daxing′an Mountains, Jiagedaqi* 165000, *China*

基金项目:中共中央组织部“千人计划”项目;国家自然科学基金项目(41501089,41301364);中国博士后科学基金项目(2015M580241)

收稿日期:2017-01-10;　　**网络出版日期**:2017-11-12

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: hehs100@ nenu.edu.cn

Abstract: Boreal forests retain larger carbon reserves than other biomes. The boreal forests of China are in the Great Xing'an Mountains region, which contains approximately 24%—31% of the total forest carbon storage in China, and thus plays an important role in maintaining the national carbon balance. Timber harvest is a major anthropogenic disturbance in boreal forests, affecting forest structure and aboveground forest biomass over the long term. High-intensity harvest has resulted in simplification and homogenization of forest structure and composition in the past. Therefore, the Natural Forest Conservation Policy and the Commercial Harvest Exclusion Policy were successively implemented in 2000 and 2014, respectively, to balance ecological restoration and timber supply. The objective of this study was to investigate long-term effects of Commercial Harvest Exclusion on the structure and biomass of a boreal forest landscape in northeastern China. To do this, we simulated the effects of Natural Forest Conservation and Commercial Harvest Exclusion on forest structure and biomass using a spatially explicit forest landscape model (LANDIS PRO). We initialized the model using forest inventory data (second and third tier data from 2000) and conducted simulations for the Great Xing'an Mountains from 2000 to 2100. Our results suggested that 1) density and basal area between the initialized modeling results and forest inventory data in 2000 were consistent ($P<0.01$), suggesting that the initialized model results could represent the real forest landscape, and harvest results adequately represented real harvest events. 2) Larch and birch were now dominant, whereas a low proportion of aspen and spruce was present. Compared to the Natural Forest Conservation scenario, the Commercial Harvest Exclusion reduced the diversity of tree species by raising the proportion of the dominant species (larch and birch) and reducing the proportion of protected rare species (pine and spruce). There was a significant effect on forest composition in the medium and long-term periods. Overall, basal area was higher and density was lower under the Commercial Harvest Exclusion scenario than those under the Natural Forest Conservation scenario. 3) Commercial Harvest Exclusion strongly decreased tree abundance in the early stage and increased their abundance in the late, old-growth stage. 4) Compared to the Natural Forest Conservation scenario, the simulated biomass and rate of forest regeneration increased under the Commercial Harvest Exclusion scenario across all simulation periods. Commercial Harvest Exclusion helped to increase overall forest biomass, but reduced the biomass of pine and spruce, two rare and economically important species, suggesting that greater intensity of sylvicultural treatments are needed. These results could help to develop a forest management policy for the region.

Key Words: commercial harvest exclusion policy; classification management; Great Xing'an Mountains; forest structure; aboveground biomass; LANDIS PRO

森林在陆地生态系统中居于主体地位,提供着重要的生态、经济和社会服务价值[1-2]。大兴安岭林区属于欧亚大陆北方针叶林向南延伸的一部分,占我国森林面积和蓄积的24%—31%,是我国主要的木材生产基地和生态屏障[3]。研究表明,地处中高纬度地区的北方针叶林对自然和人为干扰的响应敏感[4-6]。采伐作业是最重要的人为干扰之一,对大兴安岭森林景观产生了显著的影响,改变了森林树种组成、年龄结构、空间分布格局及森林碳储量,森林植被变得单一化和均质化[7-9]。

为解决天然林资源保护和恢复问题,实现林区资源、经济、社会的协调发展,国家于2000年10月启动了"天然林资源保护工程"(后文简称天保工程),实施分类经营管理方案,即由区域性皆伐为主的采伐方式改为以生态效益为主的选择性采伐[10]。已有研究表明天保工程的实施促进了森林质量的提高[11-13],森林植被得到了有效的恢复[14]。为进一步促进天然林的快速恢复与发展,增加森林面积和蓄积量,2014年10月《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十三个五年规划的建议》提出全面停止天然林商业性采伐(后文简称全面停伐),仅进行抚育伐。相比天保工程下的分类经营方案,全面停伐方案能否进一步改善森林树种组成与年龄结构,能否增加森林分布面积,能否促进森林地上生物量(蓄积量)的恢复是目前没有回答的问题。此外,是否优势树种与珍贵树种都能得到恢复尚不明确,需要进一步评估研究。

森林演替及其对干扰的响应是一个长期的过程,通常发生在几十甚至几百年的时间尺度上。因此,需要

在长时间尺度上开展新的天然林全面停伐政策实施潜在效果的评估。空间直观景观模型(LANDIS PRO)是当前国际上研究森林景观长期动态变化的主流模型,在国内外得到广泛的采用[15-18]。为此,本研究拟采用 LANDIS PRO 模拟全面停伐对大兴安岭森林景观的长期影响,进而回答上述问题,为评价全面停伐在大兴安岭林区实施的生态效益及制定合理的森林经营管理方案提供参考。

1　研究区概况

研究区为黑龙江省大兴安岭中部的呼中、塔河、新林 3 个林业局(122°30′54″—125°35′8″E,51°34′28″—53°24′41″N)(图 1)。研究区南北长约 235km,东西宽约 200km,总面积约 $2.8\times10^6 hm^2$。大兴安岭地区属于浅山丘陵地貌,海拔在 170—1520m,主脉位于西南部,地势较东北部高,总体较平缓,坡度较小。属寒温带大陆性季风气候带,年均气温-2.8℃,年均最低温低于-40℃,最高温达 35℃。土壤以棕色森林土为主,并伴有草甸土、沼泽土和石质土。其中,草甸土和沼泽土一般含有冻土层。该地区地带性植被是典型的寒温带针叶林,并伴有少部分温带针阔混交林(图 1b)。主要针叶乔木树种:兴安落叶松(*Larix gmelinii*(Rupr.) Kuzen)、樟子松(*Pinus sylvestris*var. *mongolica* Litvinov)、云杉(*Picea koriensis*Nakai)和偃松(*Pinus pumila*(Pall.) Regel)。主要阔叶乔木树种:白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、山杨(*Populus davidiana* Dole)和甜杨(*Populus suaveolens* Fisch)。兴安落叶松与白桦为该地区绝对优势树种。白桦主要是干扰形成的次生林,环境适应能力强,为先锋树种;山杨仅分布于低海拔的阳坡;偃松多分布于高海拔的山地地区。樟子松是抗寒抗旱的阳性树种,防风固沙作用显著。大兴安岭云杉主要包括鱼鳞云杉与红皮云杉,红皮云杉作为濒危物种红色名录中的低危(LC, Least Concerned)树种,与樟子松均为大兴安岭林区珍贵树种。

2　研究方法

2.1　LANDIS PRO 模型介绍

森林景观模型 LANDIS PRO 是一种基于栅格数据,模拟森林演替、种子传播、自然干扰(如林火、风倒)和人为干扰(如森林采伐)等景观过程的空间直观景观模型。LANDIS PRO 可在景观水平上有效地模拟各种干扰及其相互作用对森林景观的影响[19-20]。

在 LANDIS PRO 模型中,将整个森林景观划分为若干个相同大小的像元(格网),在每一个像元中记录植被信息(树种、年龄、株数),并跟踪记录每个像元上不同树种\年龄级的胸高断面积、树种株数等信息,从而实现对森林时空变化的模拟。像元上记录的信息随着自然演替、景观过程等的介入而发生变化。LANDIS PRO 模型能够从树种、立地和景观等多个水平上模拟外界环境(气候变化、干扰等)作用下的森林树种组成和林分结构变化。

在演替模块中,每个像元上的树种生活史属性控制着植被演替过程。依据树种年龄级属性确定树木的出生、生长和死亡过程,并记录各个年龄级相应的树种株数信息。通过林分密度来决定树种生长空间、建群概率与自稀疏过程。在采伐模块中,将像元划分形成管理区图和采伐立地图来实现采伐模拟。根据管理方案将研究区分为不同的管理区域,为具体的采伐事件提供发生边界。采伐立地图提供采伐作业的基本单元图,由管理区细划的相邻面积较小的立地单元组成。关于 LANDIS PRO 模拟森林采伐的介绍可以参考 Gustafson 等[21]。

2.2　模型参数化

LANDIS PRO 模型的输入参数包括空间参数和非空间参数两类。空间参数主要包括土地类型图、树种组成图、森林管理规划图、采伐立地图(图 1)。为了保证模拟精度的同时减少计算机负荷量,本文将所有空间参数图重采样到 90m×90m 的空间分辨率。非空间参数主要有树种生活史属性、树种建群概率(SEP, Species Establishment Probability)及采伐参数。本文选择研究区内 5 个主要树种(生物量占研究区总生物量 95%[4])进行模拟,具体树种生活史属性[22]见表 1。

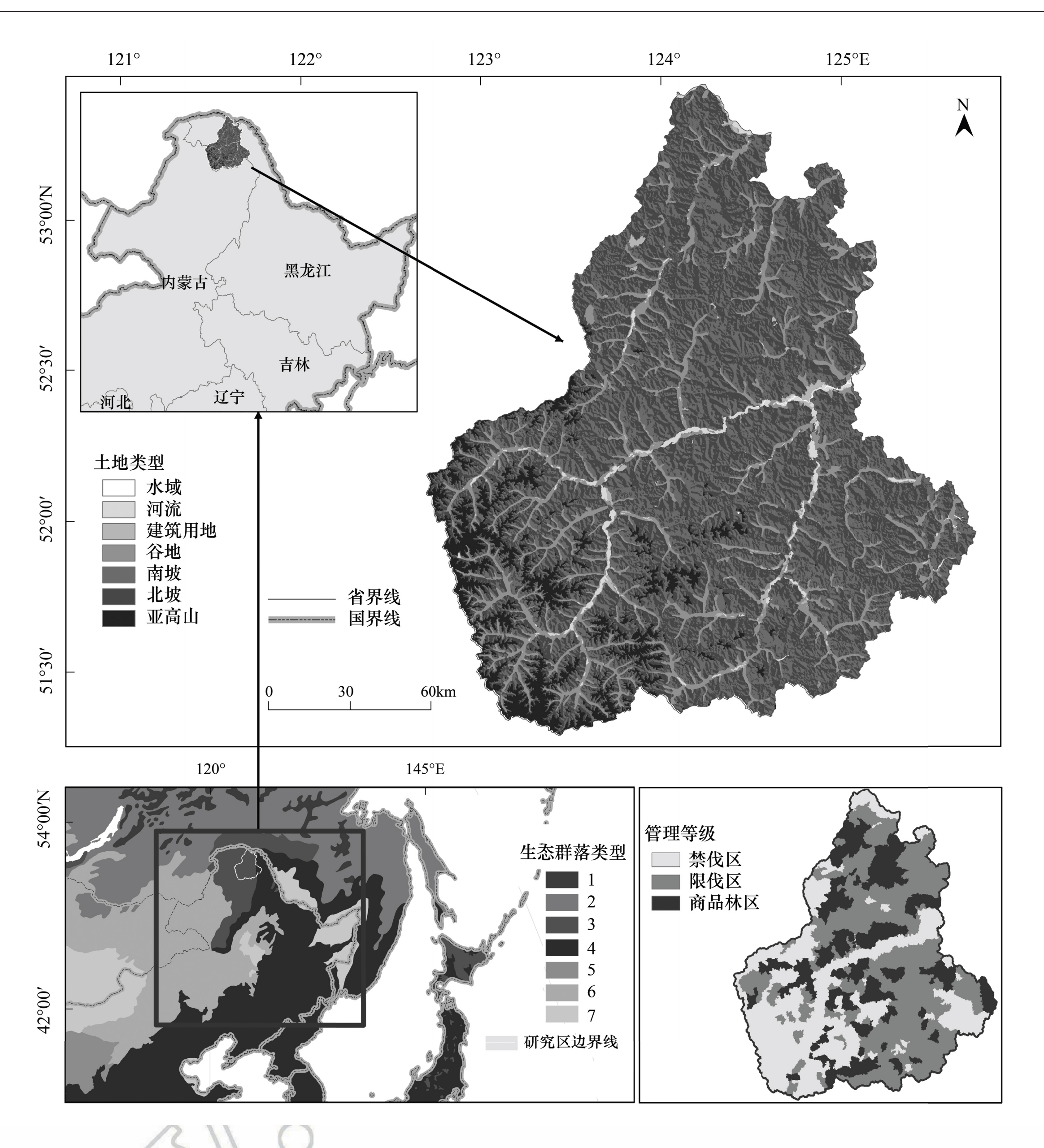


图 1 研究区概况图

Fig.1 The location, landtype, terrestrial Biomes and management area of the study area

图 1(b)中,1:苔原,Tundra;2:北方森林/针叶林带,Boreal Forest/Taiga;3:寒温带针叶林,Temperate Conifer Forests;4:温带针阔混交林,Temperate Broadleaf and Mixed Forests;5:高山草原与灌丛带,Montane Grasslands and Shrublands;6:温带草原、稀树草原与灌丛带,Temperate Grasslands, Savannas and Shrublands;7:淹水草原与稀树草原,Flooded Grasslands and Savannas

树种组成图是由一系列栅格组成的 GIS 输入图件,包含树种类型、株数、年龄信息。其数据来源于研究区 2000 年的林相图与野外森林调查数据(树种的株数和径级信息)。根据地形、土壤、土地利用方式等将研究区的森林景观划分为多个相对均质的单元,形成土地类型图。模型假定在每一个土地类型上,同一树种具有相对一致的最大生长空间(MGSO, Maximum Growing Space Occupied)与建群概率(SEP)。MGSO 与 SEP 可以反映每一土地类型上树种对环境的响应[23]。

采伐预案参数:按照经营管理要求,将研究区划分为三个管理区:禁伐区(35%),限伐区(40%)和商品林区(25%)。基于胸高断面积 BA (Basal Area)确定采伐规则,即模型从平均 BA 最高的立地单元开始采伐,直至满足要求(达到管理区目标采伐面积比)停止采伐。立地单元内采取择伐方式,即模型按照树木 BA 顺序(商业性采伐:从大到小;抚育伐:从小到大)进行采伐。在过去 30a 中,松树和云杉由于高经济价值,被大量

砍伐,保有量较少,得到当地林业局的保护。因此,根据分类经营的管理政策,采伐的物种限于落叶松,桦树和山杨(商业性采伐树种年龄:落叶松 120—300,白桦 60—150,山杨 40—120)。具体采伐预案参数[24]见表 2。

表 1　研究区主要树种生活史属性

Table 1　Species life history attributes for the study area

主要树种 Major species	寿命 Longevity/a	成熟年龄 Maturity age/a	耐荫性 Shade tolerance	耐火性 Fire tolerance	最大种子传播距离 Maximum seeding distance/m	最大平均胸径 Maximum mean diameter/cm	最大林分密度 Maximum stand density/(株/hm^2)	潜在种子萌发数 Potential germination seeds
落叶松 *Larix gmelinii*	300	20	2	4	150	55	600	10
樟子松 *Pinus sylvestris*	250	25	2	3	200	60	560	20
白桦 *Betula platyphylla*	150	15	1	3	2000	30	690	30
山杨 *Populus davidiana*	120	10	1	2	2000	50	680	30
云杉 *Picea koraiensis*	300	30	4	1	150	60	520	10

表 2　采伐预案参数

Table 2　The parameters for harvest scenario

管理区 Management area	采伐方式 Harvest type		树种移除 Removal species/order		采伐面积比例 Proportion treated	
	商业性采伐 Commercial harvest	抚育伐 Tending harvest	商业性采伐 Commercial harvest	抚育伐 Tending harvest	商业性采伐 Commercial harvest	抚育伐 Tending harvest
禁伐区 Harvest banned	—	—	—	—	—	—
限伐区 Harvest restricted	择伐(大树)	择伐(小树)	L, B, A	B, L, A	0.13/5 年	0.03/5 年
商品林区 Harvest permitted	择伐(大树)	择伐(小树)	L, B, A	B, L, A	0.15/5 年	0.05/5 年

L:落叶松,larch;B:白桦,birch;A:山杨,aspen;商业性采伐优先顺序依此为落叶松,白桦和山杨,从最大胸径的树种开始采伐;抚育伐优先顺序依此为白桦,落叶松和山杨,从最小胸径的树种开始采伐

2.3　模拟预案与数据分析

本研究设计 3 个方案(分类经营方案、全面停伐方案、无采伐方案)进行模拟,模拟步长为 5a。分类经营方案根据禁伐区、限伐区、商品林区的采伐目标模拟 2000—2100 年森林采伐。采伐以商业性采伐为主,伴有抚育伐(表 2)。2014 年以后,大兴安岭在"天然林保护工程"基础上全面停止了天然林商业性采伐,因此全面停伐方案 2000—2015 年以分类经营方案相同的采伐方式模拟森林采伐(商业性采伐+抚育伐),2015—2100 年只进行抚育伐,无商业性采伐。无采伐方案模拟森林无任何干扰下的自然演替过程(只考虑种子传播和树种竞争对森林碳储量的影响,不模拟采伐),为以上两种方案提供参考。为了减少模型内在随机性带来的误差,每一种预案重复 5 次,并计算其均值作为模拟结果。

利用平均林分林木胸高断面积(MBA, Mean Basal Area)、林分密度、地上生物量等变量分析树种组成结构与年龄结构。采用单因素方差分析与多重比较(Duncan 检验)的方法,分析全面停伐方案在短期(30—40a),中期(40—60a)与长期(60—100a)中森林景观树种组成和年龄结构的差异。由于本研究从 2015 年起开始执行全面停止商业性采伐,因此在做差异比较时前 15 年(2010—2015)不予考虑。

2.4　模型验证

选取了 2000 年森林调查数据。将其中的 70%用于模型初始化。通过调整模型树种生长曲线等参数,直到模拟的立木密度和截面积和森林调查数据相吻合;余下的 30%的森林调查数据用于验证模型初始化结果[25]。

将不同管理区 2013 年(由于模拟时间步长为 5a,本研究将 2010 年与 2015 年模拟值的均值作为 2013 年的模拟值)的模拟林分密度和地上生物量与 2013 年的森林调查数据做比较,在禁伐区、限伐区、商品林区分别选取 1268、1729、952 个样点。本研究不断尝试校正采伐模块参数,以保证不同管理区模拟的平均林分密度和

森林地上生物量与森林调查数据相一致。由于在禁伐区没有采伐事件,其验证结果可作为森林演替模拟结果的验证;以限伐区和商品林区的验证结果来反映采伐事件的真实性。

3 结果

3.1 模拟结果验证

3.1.1 模型校验

校验结果表明,基于森林调查数据构建的 2000 年初始森林景观与 2000 年的真实森林景观具有较高的吻合性(林分密度:$R^2=0.82$,$P<0.01$;森林地上生物量:$R^2=0.90$,$P<0.01$)(图 2)。

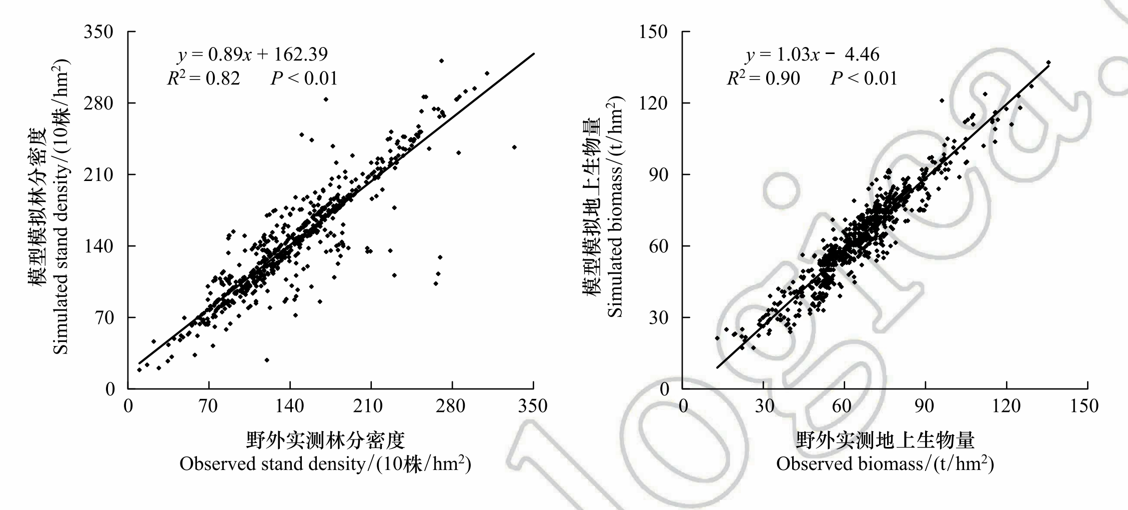


图 2 研究区 2000 年林分密度和地上生物量的野外实测值和模型模拟值的比较

Fig.2 Scatter plot showing the relation between observed and predicted values for stand density and biomass at year 2000

3.1.2 演替与采伐模拟结果验证

模拟结果显示,2013 年平均林分密度表现为:禁伐区(3416 株/hm^2)<限伐区(4196 株/hm^2)<商品林区(4910 株/hm^2)(图 3)。但平均森林地上生物量表现出相反的趋势(禁伐区 76.84t/hm^2>限伐区 65.67t/hm^2>商品林区 58.09t/hm^2)(图 3)。这是因为禁伐区没有受到采伐干扰,商品林区的树木受到采伐干扰比限伐区频繁,森林采伐给先锋树种(白桦和山杨)提供了更多的生长空间。这表明模拟结果与理论相一致[4]。从总

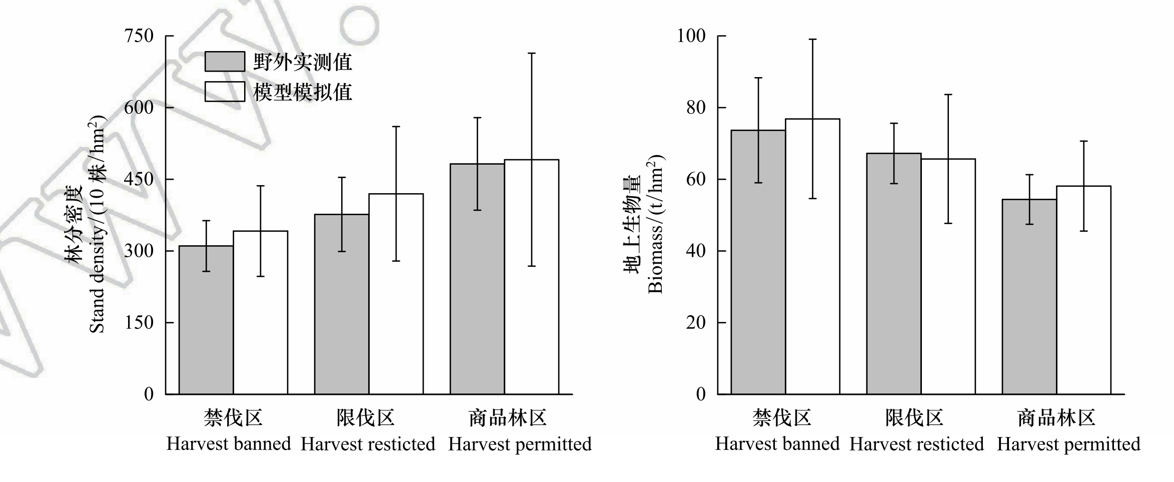


图 3 研究区 2013 年不同管理林区的林分密度和地上生物量的实测值和模拟值的比较

Fig.3 Mean values of density and biomass by harvest banned, restricted and permitted area for the observations and predictions at year 2013

体上看,禁伐区、限伐区、商品林区的模拟结果与野外实测值差异不大,说明模型模拟结果可代表真实景观。

3.2 全面停伐对树种组成的影响

3.2.1 全面停伐对树种平均林分胸高断面积与林分密度的影响

模拟结果表明,两种采伐方案下,平均林分林木胸高断面积(MBA)与林分密度均反映了在森林组成上以落叶松与白桦为主,樟子松次之,山杨与云杉比例较小的树种组成格局。但随着模拟时间延长,树种组成比例呈现出明显差异树(图 4)。

在全面停伐方案下,落叶松、樟子松、云杉的 MBA 随模拟时间的延长逐渐增大;白桦与山杨在模拟前 60 年较稳定(有小幅度增大),60 年后开始有明显的下降趋势。在模拟的前 15 年由于商业性采伐,各树种林分密度均有明显的增大;但随着全面停伐的实施,白桦与山杨林分密度减小,落叶松与樟子松林分密度呈增加趋势,而云杉林分密度较稳定。Duncan 检验结果表明,各树种 MBA 在模拟短期与中期无明显的差异,而模拟中期与长期差异显著($P<0.05$)(表 3);在林分密度方面,落叶松与樟子松在模拟长期显著增大(短期<中期<长期($P<0.05$)),白桦(短期<中期($P<0.05$)<长期)与山杨(短期<中期($P<0.05$)<长期($P<0.05$))在模拟中期显著降低(表 4)(图 4)。

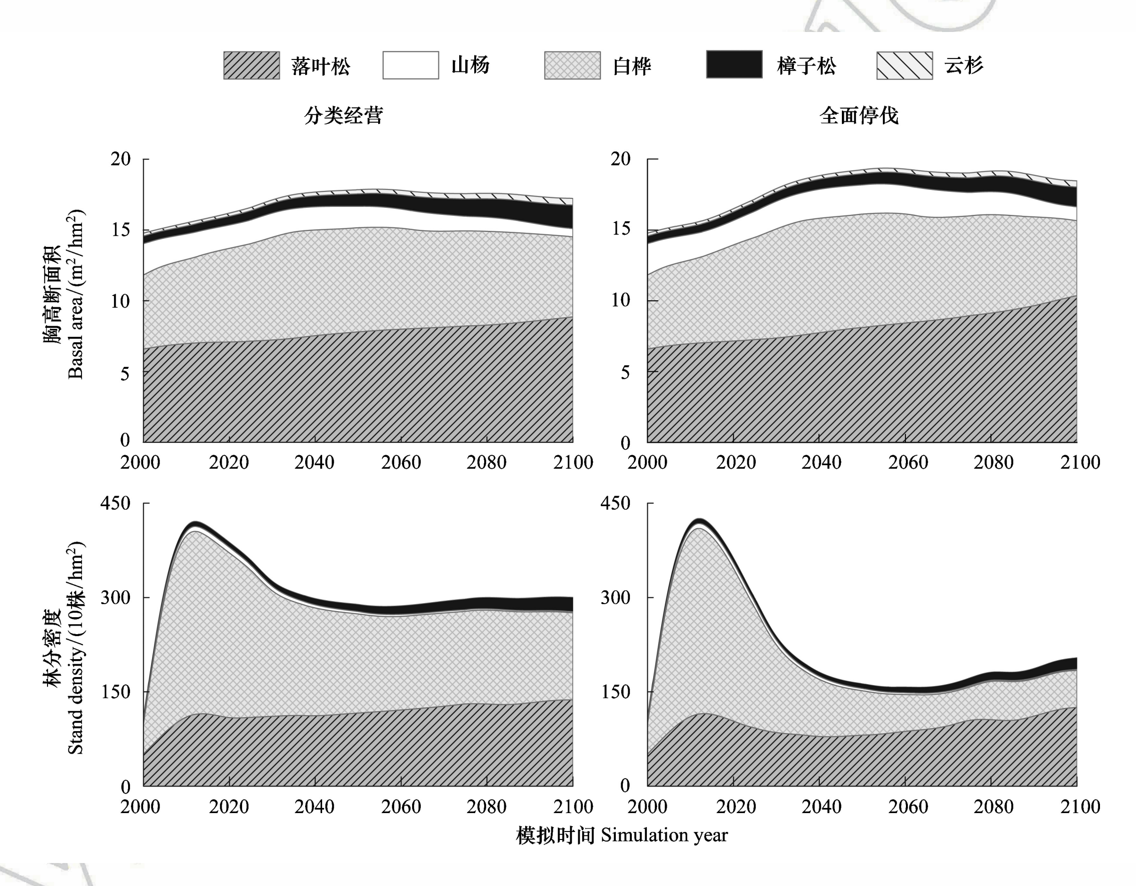


图 4　分类经营与全面停伐预案下不同树种胸高断面积与林分密度动态变化

Fig.4　Predicted basal area, density by forest Classification Management and Commercial Harvest Exclusion at landscape scales over 100 years

与分类经营相比,全面停伐增大了 MBA,减小了林分密度。其中,白桦林分密度的减小最为明显;增加了落叶松(中长期显著)、白桦(短中期显著)、山杨(短中长期显著)的平均胸高断面积($P<0.05$),减小了云杉与樟子松的平均胸高断面积(均无显著性差异 $P>0.05$);降低了所有树种的林分密度,而山杨林分密度仅在长期有显著性下降,其余树种在 3 个模拟时期均有显著性下降($P<0.05$)(图 4,表 3、4)。

表 3 不同模拟时期分类经营与全面停伐树种平均胸高断面积的差异性比较/(m^2/hm^2)

Table 3 Species mean basal area dynamics for forest Classification Management and Commercial Harvest Exclusion under three simulated scenarios (different letters indicate significant difference at α=0.05)

树种 Species	分类经营 Classification Management			全面停伐 Commercial Harvest Exclusion		
	短期 Short-term	中期 Mid-term	长期 Long-term	短期 Short-term	中期 Mid-term	长期 Long-term
落叶松 *Larix gmelinii*	7.37c	7.84b	8.39a	7.55b	8.19b*	9.34a*
白桦 *Betula platyphylla*	7.44a	7.309a	6.41b	7.98a*	7.93a*	6.57b
山杨 *Populus davidiana*	1.67a	1.48a	0.93b	2.00a*	2.05a*	1.50b*
樟子松 *Pinus sylvestris*	0.73b	0.92b	1.36a	0.68b	0.82b	1.15a
云杉 *Picea koraiensis*	0.26b	0.30b	0.40a	0.24b	0.28b	0.36a

a、b、c(a′、b′、c′)字母不相同表示采伐方案内各阶段差异比较 $P<0.05$, * 表示预案 1 与预案 2 差异比较 $P<0.05$

表 4 不同模拟时期分类经营与全面停伐林分密度的差异性比较/(10 株/hm^2)

Table 4 Species density dynamics for forest Classification Management and Commercial Harvest Exclusion under three simulated terms (different letters indicate significant difference at α=0.05)

树种 Species	分类经营 Classification Management			全面停伐 Commercial Harvest Exclusion		
	短期 Short-term	中期 Mid-term	长期 Long-term	短期 Short-term	中期 Mid-term	长期 Long-term
落叶松 *Larix gmelinii*	111.79b	117.54b	131.13a	81.75b′*	82.69b′*	107.40a′*
白桦 *Betula platyphylla*	182.10a	155.02b	145.83b	110.34a′*	67.60b′*	57.48b′*
山杨 *Populus davidiana*	6.04a	3.64b	2.23c	5.94a′	3.44b′	1.87c′*
樟子松 *Pinus sylvestris*	7.98c	10.92b	17.42a	5.40b′*	6.97b′*	12.70a′*
云杉 *Picea koraiensis*	1.03ab	1.01b	1.07a	0.92a′*	0.83a′*	0.91a′*

3.2.2 全面停伐对树种地上生物量的影响

从天保工程实施(2000 年)后,采伐干扰导致森林地上生物量呈下降趋势,到 2015 年森林地上生物量损失 6.24t/hm^2(采伐方案 65.59t/hm^2,无干扰方案 71.83t/hm^2)。在全面停伐实施后约 10 年时间,由采伐导致的地上生物量损失得到恢复,并于 2090 年左右森林地上生物量与无干扰状态接近,尤其在后期甚至超过无干扰状态。2015—2060 年,森林生物量累计速度表现为全面停伐方案>无干扰预案>分类经营方案。2060 年后,生物量开始呈下降趋势(图 5)。

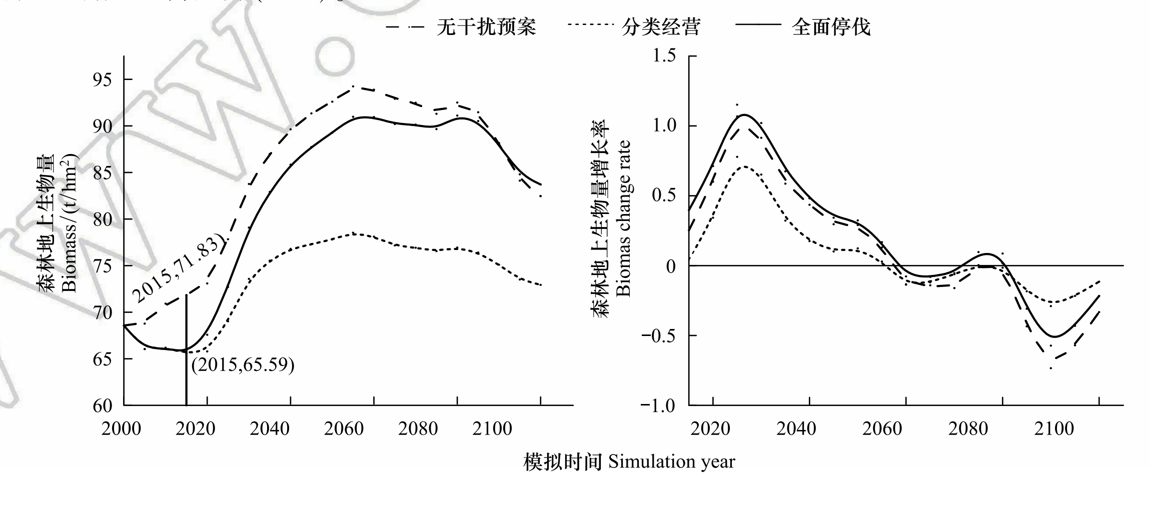


图 5 无干扰预案、分类经营与全面停伐下森林地上总生物量及生物量增长率的比较

Fig.5 Change in biomass at the landscape level in relation to simulation year by species for forest Classification Management, Commercial Harvest Exclusion and no distance scenarios

(2015,65.59)与(2015,71.83)为全面停伐实施起始年采伐预案与无干扰预案下森林地上生物量

不同树种生物量对全面停伐方案的响应不同。由于落叶松与白桦、山杨均为采伐树种,在实施停伐后生物量增加。但其变化趋势有差异(这与其自身属性有关),均在中长期表现出显著差异性($P<0.05$)。单优势树种落叶松的生物量增加幅度持续上升,而白桦与山杨的生物量增加量呈先升后降趋势。樟子松生物量表现为显著下降趋势($P<0.05$),云杉生物量也有下降,但下降趋势不明显($P>0.05$)(图 6,图 7)。

3.3　全面停伐对森林年龄结构的影响

本研究根据森林龄级划分标准(国家森林资源连续清查主要技术规定),将森林划分为幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林、过熟林 5 种龄组(表 5)。

全面停伐方案下,模拟初期,林分以中幼龄为主,随着模拟时间延长,成、过熟林所占比例逐渐增大。对比分类经营方案,全面停伐方案降低了中幼龄林的胸高断面积,提高了成、过熟林的胸高断面积,降低了中幼龄林的林分密度,提高了近、成、过熟林的林分密度(图 8)。单因素方差分析结果表明,在中、长期内全面停伐对森林年龄结构影响显著(表 6、7,$P<0.05$)。

4　结论与讨论

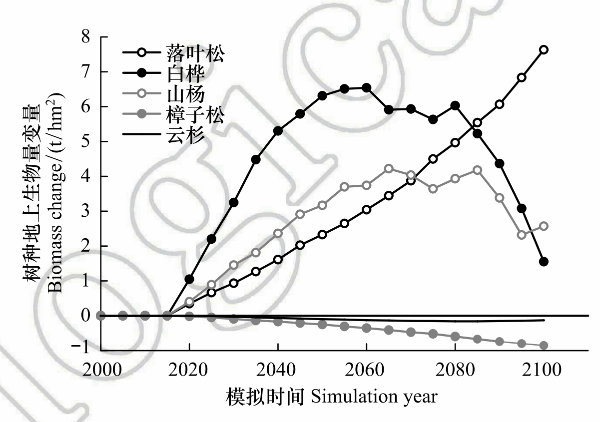


图 6　不同树种生物量变化量(全面停伐-分类经营)的动态变化

Fig. 6　Change in biomass (Commercial Harvest Exclusion-Classification Management) at the landscape level in relation to simulation year by species

景观模型预测是在大的时间和空间范围开展,其独立数据集很难获取,因此森林景观模型验证比较困难。以往的研究多通过将模拟结果与其他模型结果或局部的样地数据及经验性的知识作比较来验证[26-29],而评估森林采伐干扰的影响研究并不多见。本研究模型模拟结果与森林调查数据较吻合,模型模拟结果具有真实可靠性。

落叶松能够适应大兴安岭地区多年冻土环境,为区域单优势顶级群落树种[30]。大兴安岭在过去几十年间,原始林大都经历过采伐,采伐后由于以白桦为主的阔叶树种侵入,形成当前以落叶松、白桦为主的混交林[4,8-9]。这与白桦具有强种子扩散与着床能力等生物学特征相符合。樟子松虽然也是研究区顶级群落树种,但由于其耐荫、耐火性差等生物学特征,使其在研究区所占百分比不到 5%[31]。

在全面禁伐下,先锋阔叶树种(白桦与山杨)平均林分胸高断面积(MBA)模拟前期不断增大,60a 后有下降趋势。可能是由于白桦与山杨寿命短(120—150a),耐荫性差,在约 60a 后大量树木因达到寿命死亡。这与当前研究区林分年龄基本在 40—70a 间吻合[9]。针叶树种(落叶松、樟子松、云杉)寿命长,所以在模拟的 100a 内均保持持续生长,MBA 呈现增大趋势。在分类经营下,由于采伐大径级乔木,能够释放较多空间与资源,导致幼树的密度高于未采伐过的森林[32-33]。这一定程度上能够解释全面停伐使林分密度显著减小的现象(即幼树更新差)。白桦与山杨林分密度减小反映了阳性树种白桦与山杨耐荫性差的特性。全面停伐限制了成熟林的采伐,由于成年树种占据着绝大部分的资源,使得这些树种的幼树难以获得足够的生存空间和资源。当前的中幼林经过 80a 左右的生长大多成熟,落叶松逐渐成长为成熟林,白桦与山杨向过熟林过渡,樟子松与云杉林林龄结构变化不明显。总体上降低中幼林而提高成、过熟林、老龄林的比重。

模拟结果表明采伐会降低地上生物量,这一结果与前人在加拿大、西伯利亚中南部以及中国大兴安岭地区的研究结论基本一致[22,34-35]。研究区全面停伐后,森林恢复加快,生物量逐渐超过采伐前水平。生物量累积速率表现为全面停伐>无干扰状态>分类经营,可能是由于全面停伐的抚育伐增加了林木生长空间,促进了树木枝干生物量的增加[36],且抚育伐损失的生物量小;而分类经营方案高强度采伐降低了森林生物量。

全面停伐整体上有利于生物量的恢复,但对不同树种的影响有差异。对比分类经营,采伐树种(落叶松、

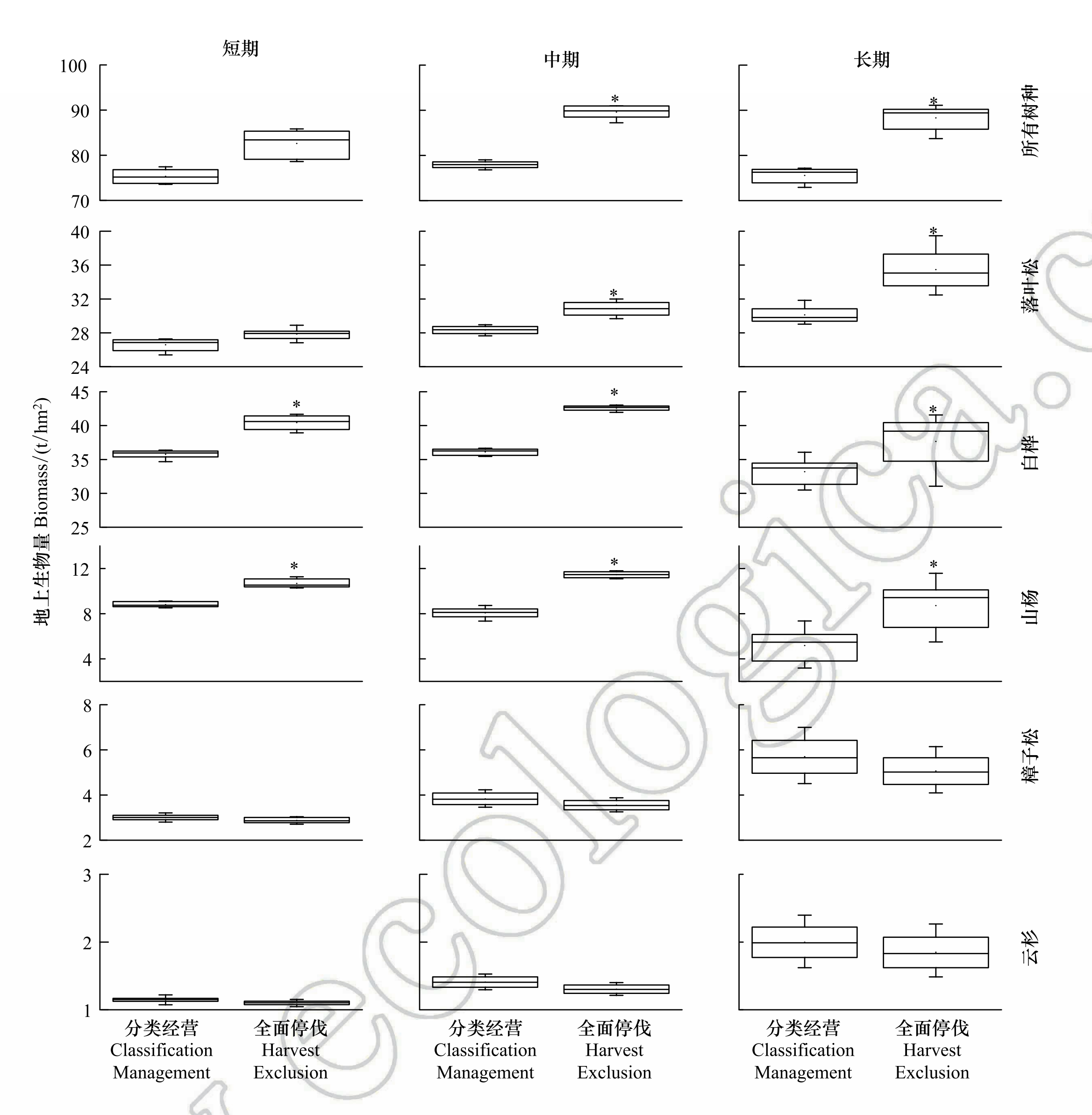


图 7 分类经营与全面停伐方案下研究区短期、中期和长期地上生物量变化比较

Fig.7 Mean biomass density in relation to time interval for forest Classification Management, Commercial Harvest Exclusion under three simulated terms

白桦、山杨)表现出生物量增加,而保护树种(樟子松与云杉)表现为生物量下降。落叶松为研究区地带性植被,靠种子传播,寿命长,模拟期生物量增加稳定;白桦和山杨为先锋物种,采伐后最先进入的林分,所以在模拟前期生长较好。但由于其寿命短,逐渐死亡,让位给寿命更长的树种,其生物量增量逐渐下降[4]。在分类经营中,采伐后的林窗能够为保护树种云杉与樟子松的成功定植和生长提供更多的空间[8-9]。由于不进行商业性采伐,且抚育伐的强度较小,林分浓密,影响到了其对光照和养分等利用效率,导致全面停伐后保护树种(樟子松与云杉)的生物量在一定程度上有所减少。樟子松为阳性树种,耐荫系数低[31],停伐增大了森林郁闭度,减少其生长所必需的光照,其生物量下降显著。对比分类经营,云杉生物量减小的不明显,可能是由于云杉林是喜冷湿的阴暗针叶林[37],全面停伐虽增大云杉与优势树种的竞争,但由于增加了林分的郁闭度,在一定程度上抑制云杉生物量的下降。在珍贵树种保护方面,全面停伐存在消极影响[38],可通过适当提高抚育伐的力度达到保护珍贵树种的目的。

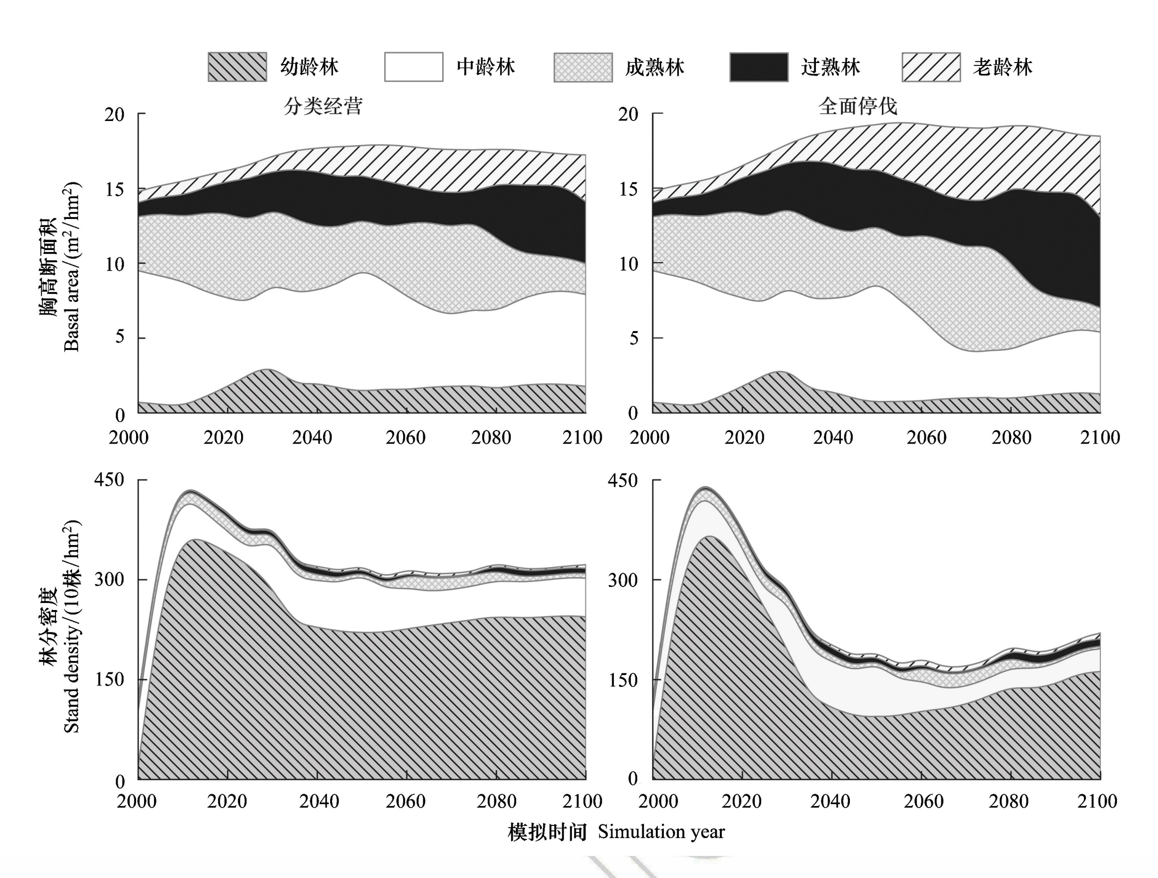


图 8　分类经营与全面停伐预案下森林年龄结构动态变化

Fig.8　Predicted density and basal area by forest age distribution at landscape scales over 100 years

表 5　树种龄组划分/a

Table 5　Age cohorts classification of forests

树种 Species	幼龄林 Young	中龄林 Middle-aged	近熟林 Immature	成熟林 Mature	过熟林 Overmature
落叶松 *Larix gmelinii*	≤40	41—80	81—100	101—140	≥141
白桦 *Betula platyphylla*	≤30	31—50	51—60	61—80	≥81
山杨 *Populus davidiana*	≤20	21—30	31—40	41—60	≥61
樟子松 *Pinus sylvestris*	≤40	41—80	81—100	101—140	≥141
云杉 *Picea koraiensis*	≤60	61—100	101—120	121—160	≥161

表 6　不同模拟时期分类经营与全面停伐树种平均胸高断面积的差异性比较/(m^2/hm^2)

Table 6　Different ages trees mean basal area dynamics for forest Classification Management and Commercial Harvest Exclusion under three simulated scenarios

龄组 Age group	分类经营 Classification Management			全面停伐 Commercial Harvest Exclusion		
	短期 Short-term	中期 Mid-term	长期 Long-term	短期 Short-term	中期 Mid-term	长期 Long-term
幼龄林 Young	2.35a	1.56b	1.81b	1.99a	0.81b *	1.12b *
中龄林 Middle-aged	5.95b	7.17a	5.55b	5.93a	6.84a	3.66b *
成熟林 Immature	4.71a	3.87a	4.04a	5.08a	4.38a	4.50a
过熟林 Mature	3.18a	2.97a	3.52a	3.78a	3.82a *	5.12a
老龄林 Overmature	1.28b	2.27a	2.57a	1.67c	3.42b *	4.52a *

表中不同字母间表示差异显著

表 7 不同模拟时期分类经营与全面停伐林分密度的差异性比较/(10 株/hm^2)

Table 7 Different ages trees density dynamics for forest Classification Management and Commercial Harvest Exclusion under three simulated scenarios (different letters indicate significant difference at α=0.05)

龄组 Age group	分类经营 Classification Management			全面停伐 Commercial Harvest Exclusion		
	短期 Short-term	中期 Mid-term	长期 Long-term	短期 Short-term	中期 Mid-term	长期 Long-term
幼龄林 Young	249.87a	222.45b	241.06ab	142.57a*	96.94b*	135.54a*
中龄林 Middle-aged	71.64a	71.72a	53.67b	71.14a	61.63a	29.75b*
成熟林 Immature	11.72a	9.20a	12.11a	12.56a	10.24a	11.75a
过熟林 Mature	7.89a	5.58a	6.00a	9.37a	7.10a	8.32a
老龄林 Overmature	2.30b	4.33a	3.67ab	3.03b	6.50a*	6.43a*

结论:1)本研究模型模拟结果得到有效验证,表明空间直观景观模型 LANDIS PRO 能够较好地运用于大兴安岭森林景观模拟研究;2)全面停伐进一步增大了优势树种落叶松与白桦比例,而减小了非优势树种云杉与樟子松的比例,加剧了树种组成比例差距,降低树种组成结构的多样性;3)全面停伐降低中幼林而提高成、过熟林、老龄林的比重,中幼龄林向成熟林过渡,可改善年龄结构;4)全面停伐有助于森林地上总生物量的恢复与累计,森林总恢复量大于采伐量。但不利于珍贵树种(樟子松与云杉)的保护,相反适当进行抚育伐有利于森林的更新。而且可通过增加抚育伐强度保护珍贵树种。

参考文献(References):

[1] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. Science, 2008, 320(5882): 1444-1449.

[2] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. Science, 2011, 333(6045): 988-993.

[3] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.

[4] 徐化成. 中国大兴安岭森林. 北京: 科学出版社, 1998.

[5] Kishchuk B E, Morris D M, Lorente M, Keddy T, Sidders D, Quideau S, Thiffault E, Kwiaton M, Maynard D. Disturbance intensity and dominant cover type influence rate of boreal soil carbon change: a Canadian multi-regional analysis. Forest Ecology and Management, 2016, 381: 48-62.

[6] Stocks B J, Fosberg M A, Lynham T J, Mearns L, Wotton B M, Yang Q, Jin J Z, Lawrence K, Hartley G R, Mason J A, Mckenney D W. Climate change and forest fire potential in Russian and Canadian boreal forests. Climatic Change, 1998, 38(1): 1-13.

[7] Yao J, He X Y, He H S, Chen W, Dai L M, Lewis B J, Yu L Z. The long-term effects of planting and harvesting on secondary forest dynamics under climate change in northeastern China. Scientific Reports, 2016, 6: 18490.

[8] 金龙如, 贺红士, 公霞, 周宇飞, 布仁仓, 孙克萍. 森林采伐对森林景观的长期影响模拟. 生态学杂志, 2008, 27(4): 539-544.

[9] 陈宏伟, 胡远满, 常禹, 布仁仓, 李月辉, 刘淼, 熊在平. 森林采伐方式对森林景观的影响模拟——以大兴安岭呼中林区为例. 生态学杂志, 2013, 32(7): 1888-1895.

[10] 张佩昌. 试论天然林保护工程. 林业科学, 1999, 35(2): 124-131.

[11] 王新闯, 齐光, 于大炮, 周莉, 代力民. 吉林省森林生态系统的碳储量、碳密度及其分布. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2013-2020.

[12] 杨金明, 范文义, 李明泽, 田利军, 毛学刚, 于颖. 长白山林区森林生物量变化定量驱动分析. 应用生态学报, 2011, 22(1): 47-52.

[13] 黄麟, 邵全琴, 刘纪远. 江西省森林碳蓄积过程及碳源/汇的时空格局. 生态学报, 2012, 32(10): 3010-3020.

[14] 徐济德. 我国第八次森林资源清查结果及分析. 林业经济, 2014, (3): 6-8.

[15] LeBrun J J, Schneiderman J E, Thompson III F R, Dijak W D, Fraser J S, He H S, Millspaugh J J. Bird response to future climate and forest management focused on mitigating climate change. Landscape Ecology, 2016: 1-14, doi: 10.1007/s10980-016-0463-x.

[16] Xiao J T, Liang Y, He H S, Thompson J R, Wang W J, Fraser J S, Wu Z W. The formulations of site-scale processes affect landscape-scale forest change predictions: a comparison between LANDIS PRO and LANDIS-II forest landscape models. Landscape Ecology, 2016: 1-17, doi: 10.1007/s10980-016-0442-2.

[17] Iverson L R, Thompson III F R, Matthews S, Peters M, Prasad A, Dijak W D, Fraser J S, Wang W J, Hanberry B, He H S, Janowiak M, Butler

P, Brandt L, Swanston C. Multi-model comparison on the effects of climate change on tree species in the eastern U.S.: results from an enhanced niche model and process-based ecosystem and landscape models. Landscape Ecology, 2016: 1-20, doi: 10.1007/s10980-016-0404-8.

[18] Liang Y, He H S, Wang W J, Fraser J S, Wu Z W, Xu J W. The site-scale processes affect species distribution predictions of forest landscape models. Ecological Modelling, 2015, 300: 89-101.

[19] 奚为民, 戴尔阜, 贺红士. 森林景观模型研究新进展及其应用. 地理科学进展, 2016, 35(1): 35-46.

[20] Wang W J, He H S, Spetich M A, Shifley S R, Thompson III F R, Larsen D R, Fraser J S, Yang J. A large-scale forest landscape model incorporating multi-scale processes and utilizing forest inventory data. Ecosphere, 2013, 4(9): 1-22.

[21] Fraser J S, He H S, Shifley S R, Wang W J, Thompson III F R. Simulating stand-level harvest prescriptions across landscapes: LANDIS PRO harvest module design. Canadian Journal of Forest Research, 2013, 43(10): 972-978.

[22] Luo X, He H S, Liang Y, Wang W J, Wu Z W, Fraser J S. Spatial simulation of the effect of fire and harvest on aboveground tree biomass in boreal forests of Northeast China. Landscape Ecology, 2014, 29(7): 1187-1200.

[23] He H S, Mladenoff D J. Spatially explicit and stochastic simulation of forest-landscape fire disturbance and succession. Ecology, 1999, 80(1): 81-99.

[24] 国家林业局. 森林抚育作业设计规定. 林造发[2014]140 号.[2014-09-29]. http://www.forestry.gov.cn/portal/main/govfile/13/govfile_2113.htm.

[25] Luo X, He H S, Liang Y, Wu Z W. Evaluating simulated effects of succession, fire, and harvest for LANDIS PRO forest landscape model. Ecological Modelling, 2014, 297: 1-10.

[26] Liu Z H, He H S, Yang J. Emulating natural fire effects using harvesting in an eastern boreal forest landscape of northeast China. Journal of Vegetation Science, 2012, 23(4): 782-795.

[27] Bu R C, He H S, Hu Y M, Chang Y, Larsen D R. Using the LANDIS model to evaluate forest harvesting and planting strategies under possible warming climates in Northeastern China. Forest Ecology and Management, 2008, 254(3): 407-419.

[28] Scheller R M, Van Tuyl S, Clark K L, Hom J, La Puma I. Carbon sequestration in the New Jersey pine barrens under different scenarios of fire management. Ecosystems, 2011, 14(6): 987-1004.

[29] 罗旭, 贺红士, 梁宇, 吴志伟, 黄超, 张庆龙. 林火干扰对大兴安岭主要林分类型地上生物量预测的影响模拟研究. 生态学报, 2016, 36(4): 1104-1114.

[30] 张汉文. 大兴安岭植被与冻土的初步研究. 自然资源研究, 1983, (4): 2-6.

[31] 王绪高, 李秀珍, 贺红士. 大兴安岭森林景观在不同火干扰及人工更新下的演替动态. 北京林业大学学报, 2006, 28(1): 14-22.

[32] Wang G L, Liu F. The influence of gap creation on the regeneration of *Pinus tabuliformis* planted forest and its role in the near-natural cultivation strategy for planted forest management. Forest Ecology and Management, 2011, 262(3): 413-423.

[33] 齐麟, 赵福强. 不同采伐强度对阔叶红松林主要树种空间分布格局和物种空间关联性的影响. 生态学报, 2015, 35(1): 46-55.

[34] Chertov O, Bhatti J S, Komarov A, Mikhailov A, Bykhovets S. Influence of climate change, fire and harvest on the carbon dynamics of black spruce in Central Canada. Forest Ecology and Management, 2009, 257(3): 941-950.

[35] Gustafson E J, Shvidenko A Z, Sturtevant B R, Scheller R M. Predicting global change effects on forest biomass and composition in south-central Siberia. Ecological Applications, 2010, 20(3): 700-715.

[36] Baldwin Jr V C, Peterson K D, Clark III A, Ferguson R B, Strub M R, Bower D R. The effects of spacing and thinning on stand and tree characteristics of 38-year-old loblolly pine. Forest Ecology and Management, 2000, 137(1/3): 91-102.

[37] 吴彦, 刘庆, 何海, 林波, 尹华军. 光照与温度对云杉和红桦种子萌发的影响. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2229-2232.

[38] 邓华卫, 布仁仓, 刘晓梅, 贺伟, 胡远满, 黄乃伟. 模拟分类经营对小兴安岭林区森林生物量的影响. 生态学报, 2012, 32(21): 6679-6687.